

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.414

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ТРАССИРОВКИ В ГИС

А.Б. ГАДАЛОВ, С.В. КОСЯКОВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: ksv@ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время для определения местоположения трансформаторных подстанций при проектировании развития распределительных электрических сетей низкого напряжения используются аналитические методы, предполагающие определение длин будущих ЛЭП по евклидовому расстоянию, либо методы сравнения нескольких альтернативных вариантов размещения с учетом маршрутов прокладки ЛЭП. Принимаемые при этом допущения приводят к тому, что для выбранного местоположения подстанции суммарная стоимость присоединяемых к ней ЛЭП может превышать возможный минимум. Использование современных ГИС-технологий позволяет моделировать маршруты прокладки ЛЭП на карте с обходом или минимальным по стоимости пересечением существующих препятствий. Эти возможности могут быть использованы для повышения качества процесса проектирования городских распределительных электрических сетей в части минимизации стоимости строительства новых ЛЭП. Однако методы организации решения такой проектной задачи в настоящее время не нашли практического применения. Целью исследования является разработка практического метода проектирования размещения электрических подстанций в среде ГИС и его проверка с использованием реальных данных.

Материалы и методы. Используются методы пространственного моделирования в среде ГИС, включая методы наложения, поиска оптимальных путей на графах и инвентаризации электрических сетей, а также методы дискретной оптимизации.

Результаты. Предложен и реализован в виде программного модуля ГИС метод автоматизированного проектирования местоположения трансформаторных подстанций в городских распределительных сетях низкого напряжения, который позволяет на стадиях выбора схемы сети находить оптимальный по стоимости вариант размещения. Приведены результаты исследования метода на примере проектирования схемы электрической сети одного из городских кварталов города Иванова.

Выводы. Полученные результаты подтверждают возможность применения ГИС для повышения качества принимаемых решений по выбору местоположения распределительных подстанций низкого напряжения при проектировании городских электрических сетей и могут быть использованы в составе САПР электрических сетей.

Ключевые слова: проектирование электрических сетей, пространственное моделирование, размещение электрических подстанций, ГИС, поиск маршрутов

DESIGN OF POWER SUBSTATION PLACEMENT WITH GIS TRACING TOOLS

A.B. GADALOV, S.V. KOSYAKOV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: ksv@ispu.ru

Abstract

Background. Analytical methods that are currently used to determine transformer substation placement in the process of planning the development of low-voltage distribution networks are based on calculating the lengths of future power lines by Euclidean distance, or methods for comparing several alternative placement options taking into account the routes of power lines. Assumptions made in this case lead to the fact that for the selected location of the substation, the total cost of the power lines connected to it may exceed the possible minimum. The use of modern GIS technologies allows simulating the routes of laying power lines on the map bypassing the existing obstacles or finding the cheapest routes for crossing them. These opportunities can be used to improve the quality of designing urban distribution networks through minimizing the construction cost of new power lines. However, the methods of organizing the solution to such a design problem have not yet found practical applications. The aim of the work is to develop a practical method of designing the placement of power substations in the GIS environment and its verification using real data.

Materials and methods. The paper uses methods of spatial modeling in the GIS environment, including methods of overlay, finding optimal paths on graphs and power grid inventory, as well as discrete optimization methods.

Results. A method of computer-aided design of transformer substation placement in urban distribution low-voltage networks is proposed and implemented as a GIS software module, which allows finding the optimal options of the placement cost at the stages of network scheme selection. The paper presents the results of the method analysis based on studying the design of the power grid scheme of Ivanovo city quarters as an example.

Conclusions. The results confirm the possibility of using GIS to improve the quality of decisions on the choice of placement of low voltage distribution substations when designing urban electrical networks and can be used in the electrical networks CAD.

Key words: power network design, spatial modelling, placement of transformer substations, GIS, route searching

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.4.075-083

Введение. Одной из задач, решаемых при проектировании распределительных электрических сетей (ЭС), является выбор местоположения трансформаторных подстанций (ТП). В настоящее время для решения этой задачи используются математические методы, позволяющие аналитическим путем определить центр электрических нагрузок (ЦЭН), в котором следует размещать ТП. В основу методов определения ЦЭН положена аналогия с расчетом центра тяжести фигур на плоскости. Каждый потребитель представляется на генеральном плане территории кругом, площадь которого пропорциональна потребляемой мощности, а оптимальное местоположение ЦЭН является центром тяжести этих кругов. Координаты местоположения ТП ($x_{ТП}$, $y_{ТП}$) в таком случае определяются выражениями:

$$x_{ТП} = \frac{\sum_{i=1}^N s_i x_i}{\sum_{i=1}^N s_i}; \quad (1)$$

$$y_{ТП} = \frac{\sum_{i=1}^N s_i y_i}{\sum_{i=1}^N s_i}, \quad (2)$$

где S_i – полная мощность i -го потребителя, кВА; x_i , y_i – координаты центров нагрузки отдельных потребителей, м; N – количество потребителей.

Очевидно, что смысл этой постановки заключается в минимизации суммарного расстояния между ТП и потребителями с учетом величины мощности каждого потребителя. При этом не учитываются реальные условия прохождения ЛЭП и ограничения, существующие на территории для размещения ТП.

Другой подход, который применяется при размещении крупных объектов энергетики, таких как ТЭЦ или ГЭС, и может использоваться при размещении ТП, основан на выборе одного из нескольких возможных вариантов в условиях многокритериальности [1]. В этом

случае задается два–три местоположения ТП ($x_{ТП}$, $y_{ТП}$) и примерные маршруты прохождения ЛЭП для каждого варианта. Из этих вариантов выбирается лучший, но нельзя гарантировать, что в множество рассмотренных вариантов входит оптимальное решение с учетом критерия затрат на строительство ЛЭП.

В ряде современных исследований проблемы размещения ТП в распределительных сетях основное внимание уделяется переходу от задачи размещения единичной ТП к задаче размещения множества объектов и распределения потребителей по источникам. В такой постановке задача становится вычислительно сложной и для ее решения привлекаются методы дискретной оптимизации, например, на базе генетических алгоритмов [2]. Однако в этих работах сохраняется допущение, что длины трасс ЛЭП от ТП до потребителей определяются как прямые расстояния r в Евклидовой метрике по формуле

$$r = \sqrt{(x_{ТП} - x_i)^2 + (y_{ТП} - y_i)^2}. \quad (3)$$

В действительности, в реальных условиях городской застройки используются кабельные ЛЭП, которые прокладываются не по кратчайшим расстояниям, а по направлениям проездов и проходов между зданиями [2]. Учет этого условия при определении местоположения ТП может приводить к другим результатам, нежели использование прямых расстояний по (1)–(3). Однако степень влияния этого фактора и методы его учета при поиске местоположения ТП остаются не исследованными. Ниже приводятся результаты разработки метода размещения ТП с использованием моделирования будущих трасс ЛЭП средствами геоинформационных систем (ГИС).

Материалы и методы исследования.

Метод автоматического построения трасс кабельных ЛЭП в городах. Выбор трасс кабельных ЛЭП является неформальной задачей и осуществляется проектировщиками с учетом различных правил и ограничений в области электротехники, строительства, экологии, землепользования и т.д. Задачи автоматического проектирования трасс ЛЭП в условиях городской застройки в настоящее время в целом остаются нерешенными. С учетом того, что в рассматриваемой задаче важен не детальный маршрут ЛЭП, а его оценочная длина, при моделировании можно применить упрощенные подхо-

ды. Цель моделирования в этом случае заключается в анализе только наиболее важных пространственных условий и факторов, приводящих к существенному увеличению длины ЛЭП и игнорированию менее значительных условий, которые анализируются на стадии строительного проектирования. При такой постановке можно использовать алгоритмы построения на картах путей минимальной стоимости, в англоязычной литературе получивших название *least-cost path analysis* (LCPA). В качестве примеров работ по этой тематике можно привести исследования применения методов LCPA при реализации крупных проектов по прокладке дорог [3], магистральных ЛЭП [4], трубопроводов [5], каналов [6].

В основе методов решения задач LCPA лежит теория алгоритмов поиска оптимальных путей на графах. В литературе она получила название *All-Pairs Shortest Pathproblem* (APSP) или *Pathfinding*. Задача поиска кратчайшего пути между двумя вершинами графа состоит в нахождении цепи из источника в сток, минимизирующей стоимость прохождения потока заданной величины по данной цепи. Общая постановка задачи впервые приведена в [7]. Для решения этой задачи разработано множество алгоритмов. Наибольшую известность получили алгоритмы, которые можно разделить на эвристические (берут начало от широко известного алгоритма A^* , Astar [8]) и алгоритмы поиска в ширину (алгоритм Дейкстры (Dijkstra's algorithm) [9]).

При поиске маршрутов на карте произвольной пересеченной местности в качестве графа обычно используют регулярную прямоугольную сетку – растровую модель территории, в которой задана возможность перехода в соседние клетки по вертикали, горизонтали и диагоналям (рис. 1). Некоторые ячейки могут быть помечены как непроходимые (на рис. 1 показаны темным цветом). Данный подход, в частности, распространен в компьютерных играх.

В [10, 11] показано, как алгоритмы поиска кратчайших путей на растровых моделях пространственных данных могут использоваться для оценки стоимости технологического присоединения потребителей к электрической сети. Ниже предложено исследование возможности применения таких алгоритмов для реше-

ния другой задачи – проектирования схем энергоснабжения городских микрорайонов.

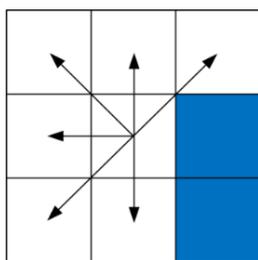


Рис. 1. Представление графа в растровой модели пространственных данных

Оценка влияния пространственных ограничений на выбор местоположения ТП. Для оценки влияния пространственных факторов городской застройки на выбор местоположения ТП проведено сравнение длин реальных ЛЭП в кварталах многоэтажной застройки города Иванова с евклидовыми расстояниями между их конечными точками. На рис. 2 представлен фрагмент карты одного из кварталов, на котором показаны кабельные ЛЭП и расчетные прямолинейные расстояния, которые используются при вычислении местоположения аналитическими методами.

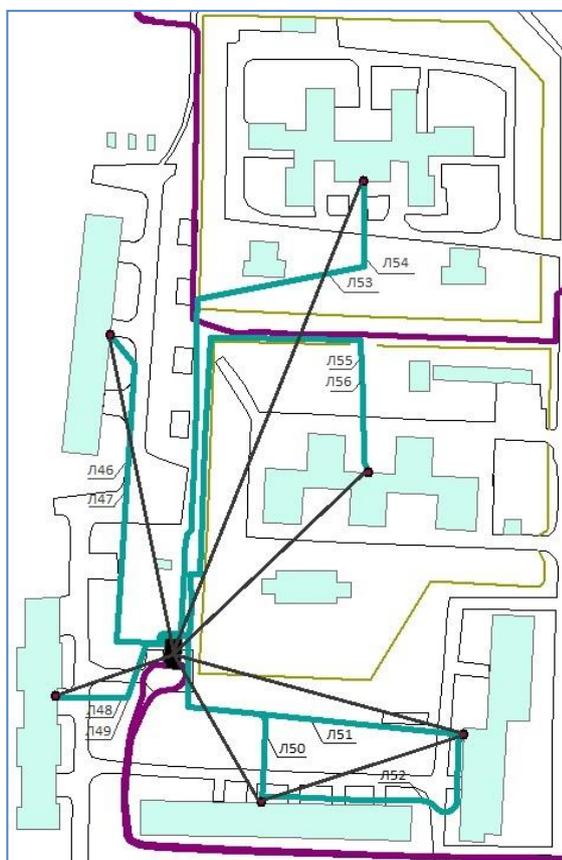


Рис. 2. Схема электрической сети городского квартала

Отношение реальной длины ЛЭП l_i к заменяющему ее при расчетах евклидовому расстоянию r_i будем называть коэффициентом влияния пространственных условий g_i :

$$g_i = \frac{l_i}{r_i}. \quad (4)$$

Значения этого коэффициента для каждой ЛЭП, изображенной на рис. 1, приведены в таблице.

Значения коэффициента влияния пространственных условий

Наименование ЛЭП на рис. 1	Длина ЛЭП l_i , м	Прямое расстояние r_i , м	Значение g_i
Л46	112	105	1,067
Л47	112	105	1,067
Л48	49	40	1,225
Л49	49	40	1,225
Л50	78	56	1,393
Л51	120	104	1,154
Л52	93	75	1,240
Л53	202	172	1,174
Л54	202	172	1,174
Л55	197	90	2,189
Л56	197	90	2,189

Следует отметить, что на точность определения местоположения ТП по формулам (1) и (2) влияют не величины g_i , а степень различия этих величин, поскольку в силу их различия зависимость длин ЛЭП от координат ТП становится нелинейной и теряется аналогия расчета ЦЭН с расчетом центра тяжести. Анализ полученных значений g_i (см. таблицу) показывает, что эти различия существенны, поэтому результаты расчетов ЦЭН по формулам (1) и (2) в этом случае будут давать существенные погрешности по сравнению с использованием реальных длин ЛЭП.

Для городских районов ситуация осложняется тем, что необходимо учитывать не только стоимость ЛЭП для связи размещаемой ТП с потребителями, но и стоимость ЛЭП для ее присоединения к сети среднего напряжения 6–10 кВ и связи ТП друг с другом на стороне среднего напряжения. Очевидно, что стоимости ЛЭП среднего напряжения будут находиться в другой зависимости от их длины и это также важно учитывать при выборе места размещения ТП.

Формализация постановки задачи размещения ТП. Задача выбора ме-

ста размещения ТП с учетом рассмотренных пространственных факторов формулируется следующим образом. Имеется множество ТП, $i = \{1, \dots, I\}$, более высокой или той же ступени напряжения, с которыми размещаемая ТП соединяется по высокому напряжению, и множество потребителей P_j , $j = \{1, \dots, J\}$, которые питаются от размещаемой ТП по низкому напряжению. Координаты других ТП (x_i, y_i) и потребителей (x_j, y_j) известны. Известны передаваемые мощности и топология сети, т.е. наличие или отсутствие ЛЭП между всеми элементами указанных множеств и их характеристики (тип, количество цепей, передаваемая мощность). Требуется найти координаты точки размещения ($x_{ТП}, y_{ТП}$) ТП таким образом, чтобы общие затраты Z на строительство всех необходимых ЛЭП были минимальными:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{i=1}^I l_i (cm_i^{BH} + k_i ck_i^{BH}) + \\ &+ \sum_{j=1}^J l_j (cm_j^{HH} + k_j ck_j^{HH}), \\ l_i &= T(x_{ТП}, y_{ТП}, x_i, y_i), \\ l_j &= T(x_{ТП}, y_{ТП}, x_j, y_j), \end{aligned} \quad (5)$$

$$x_{ТП}, y_{ТП} \in D,$$

где l_i, l_j – длина ЛЭП высокого и низкого напряжения соответственно; cm_i^{BH}, cm_j^{HH} – удельные затраты на строительство ЛЭП (прокладку траншей); ck_i^{BH}, ck_j^{HH} – удельные затраты на кабель заданной мощности; k_j – количество кабелей в трассе ЛЭП (обычно 1 или 2); T – функция определения длины ЛЭП между заданными точками методом автоматической трассировки на карте; D – ограниченная область размещения ТП, заданная полигонами на карте.

Метод решения задачи размещения ТП. Для решения поставленной задачи используется метод дискретной оптимизации, который предполагает автоматический перебор возможных вариантов размещения ТП в множестве точек допустимого размещения $d_k \in \bar{D}$, $k = \{1, \dots, K\}$, полученного путем дискретизации D . Для дискретизации используется сетка с заданным шагом.

Для каждого варианта размещения с помощью алгоритмов трассировки автоматически строятся маршруты прохождения всех ЛЭП и рассчитывается значение суммарных затрат Z по формуле (5). Из всех вариантов выбирается вариант с минимальными затратами.

Практическая реализация метода опирается на использование возможностей универсальных программных средств ГИС или САПР, дополненных специальными программными средствами расчета оптимального местоположения ТП. Общая схема решения задачи включает следующие основные этапы:

1. Формирование исходных данных для расчета универсальными методами ГИС или САПР на карте территории.

2. Построение растровой модели территории для применения алгоритмов дискретной оптимизации и трассировки с использованием известных методов графических наложений в ГИС.

3. Проведение расчетов по поиску оптимального местоположения ТП с помощью разработанных специализированных программных средств.

4. Вывод результатов расчета на карту с представлением найденного местоположения ТП и построенных маршрутов ЛЭП.

5. Оценка полученного результата проектировщиком и при необходимости изменение исходных данных с возвратом на этап 2.

Задание исходных данных проектировщиком сводится к формированию цифровой карты, которая содержит следующие слои и типы пространственных объектов:

- здания и буферные зоны вокруг них или других объектов (полигональные объекты);
- точки вводов в здания потребителей (точечные знаки);
- точки присоединения к другим ТП (точечные знаки);
- зоны ограничений для прохождения ЛЭП кроме зданий (полигональные объекты);
- зоны возможного размещения ТП (полигональные объекты).

Для каждой точки ввода и присоединения должны быть указаны количество кабелей, соединяющих эту точку с размещаемой ТП, и марка кабеля, который будет использован при строительстве ЛЭП. На внутриквартальных территориях удельные затраты на строительство принимаются равными для всех точек. При наличии зон, где прокладка кабеля нежелательна (например, проезжая часть улицы), они представляются на карте как зоны ограничений, для ко-

торых стоимость прокладки устанавливается более высокой. В этом случае алгоритмы трассировки будут стремиться к обходу этих зон или минимизации длины трасс, находящихся внутри них. Так, при необходимости пересечь проезжую часть улицы при высокой стоимости прокладки трассы внутри задающего эту территорию полигона алгоритм будет искать возможность пересечь этот полигон в наиболее узком месте под прямым углом.

На стадии проектирования все указанные данные известны и обычно уже нанесены на карту проекта застройки. Пример задания исходных данных для квартала приведен на рис. 3.

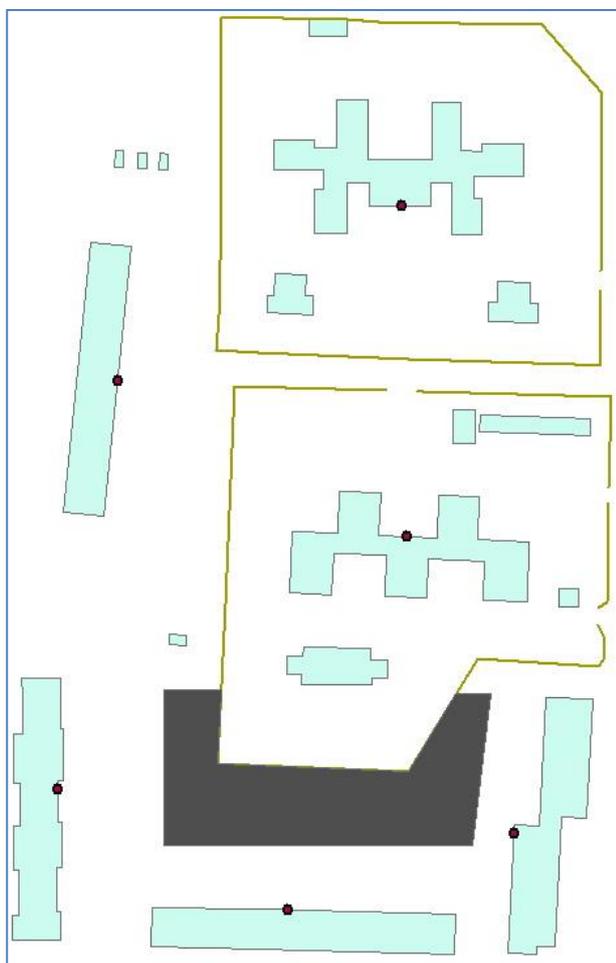


Рис. 3. Исходные данные для решения задачи размещения ТП в ГИС

Для поиска решения задачи исходная векторная картографическая модель преобразуется в растровую модель, которая может рассматриваться и анализироваться как двумерная матрица. Для этого на исследуемый участок территории накладывается пространственная сетка с заданным шагом

(в исследовании использовался шаг сетки, равный 1 метру). Ячейки этой сетки пересекаются со всеми объектами слоев, сформированных на этапе 1. В результате каждая ячейка получает ряд характеристик. Она может быть помечена как:

- проходимая или непроходимая при прокладке трассы ЛЭП;
- точка стока при построении трассы к потребителю или ТП;
- точка возможного размещения источника (размещаемой ТП).

Непроходимыми становятся ячейки сетки, которые пересекаются со зданиями и буферными зонами. Буферные зоны могут строиться как для границ зданий, так и для зеленых насаждений, опор ЛЭП и других объектов. Это позволяет учитывать ограничения, накладываемые правилами устройства электроустановок на прокладку электрических кабелей в земле. Например, запрет на прокладку кабелей ближе 0,6 м от фундаментов зданий, ближе 2 м от стволов деревьев, ближе 5 м от заземленных частей опор ЛЭП напряжением выше 1 кВ и до 35 кВ и т.д.

Ячейки, которые помечаются как точки стока и возможного размещения ТП также определяются путем установления факта их пересечения с соответствующими объектами на карте. Растровая модель квартала, представленного на рис. 3, показана на рис. 4. Серым цветом изображены непроходимые ячейки. Черным цветом показаны ячейки возможного размещения ТП и точки присоединения потребителей (x_j, y_j) .

Полученная растровая модель представляется в виде таблицы, каждый элемент которой соответствует ячейке сетки и включает значения всех необходимых параметров. Эта таблица передается в расчетную программу. Общий алгоритм расчета точки оптимального размещения ТП приведен на рис. 5.

В реализованном варианте программы для поиска оптимальных трасс используется алгоритм A^* , который запускается для построения каждого варианта ЛЭП. Шаг сетки задается при формировании расчетной модели и может варьироваться. В приведенном примере использован шаг, равный 1 метру.

Результат оптимального размещения выводится на карту, как показано на рис. 6.

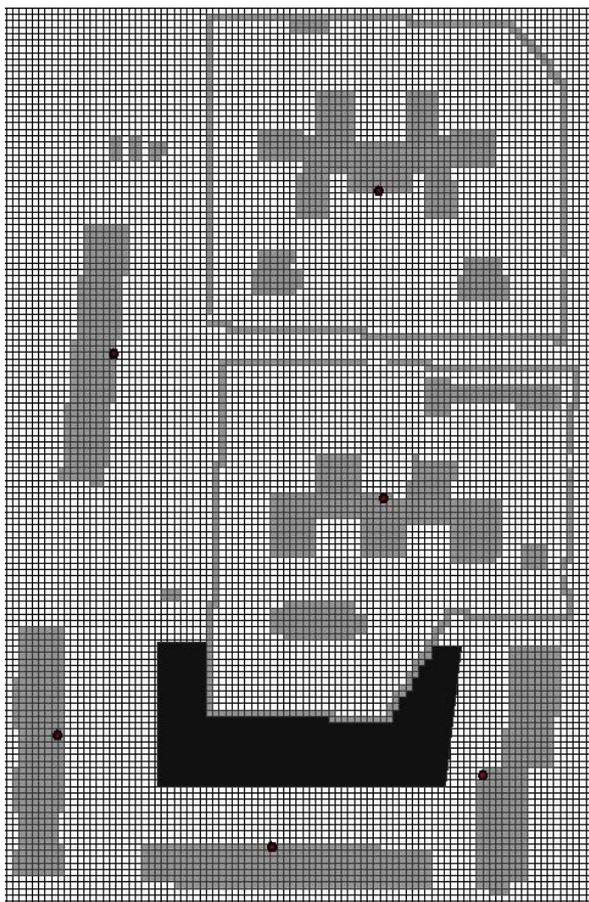


Рис. 4. Растровая модель территории

Результаты исследования. Разработанный метод был опробован путем поиска вариантов размещения для реально существующих ТП в городе Иванове. Результаты исследования метода показали, что в части случаев метод предлагает более выгодные решения по критерию минимальности длин ЛЭП по сравнению с существующими решениями. При этом реальные трассы часто оказываются несколько длиннее построенных по алгоритму трассировки и в ряде случаев имеют существенные отличия в маршруте.

Достоверно оценить причины выбора решений по прокладке трасс реальных ЛЭП на стадии их проектирования для рассмотренных случаев не представляется возможным, как и оценить влияние других факторов, которые возможно учитывались проектировщиками при размещении существующих ТП много лет назад. Вместе с тем исследованные примеры показывают, что с помощью разработанного метода удастся автоматически находить выгодные решения, которые на этапе визуальной оценки ситуации по исходным данным не являются очевидными.

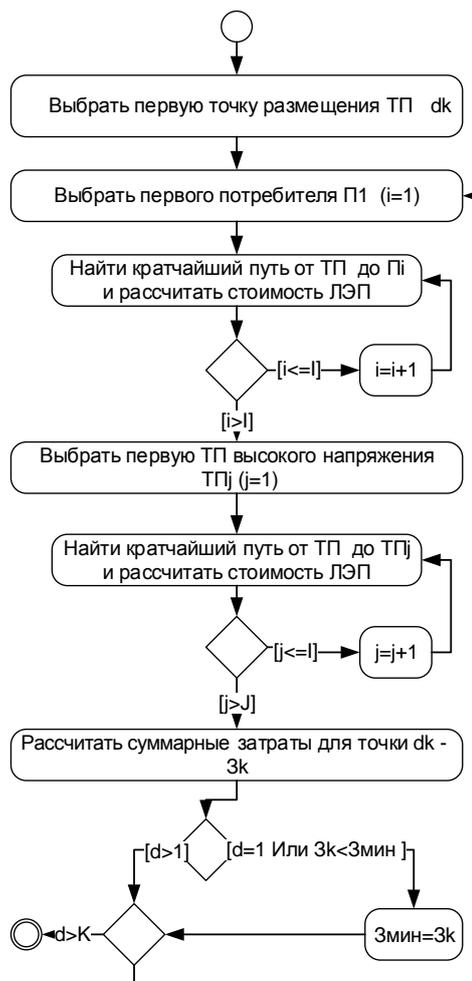


Рис. 5. Алгоритм расчета оптимального местоположения ТП

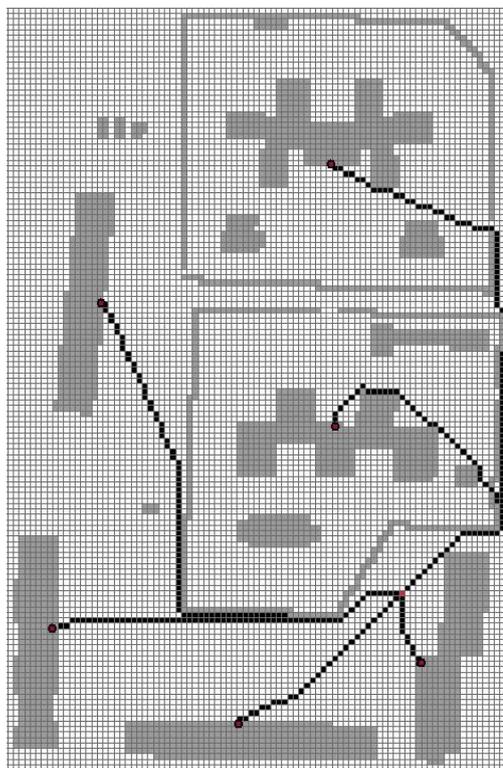


Рис. 6. Представление результата поиска оптимально размещения ТП в ГИС

С учетом возможности для проектировщика оперативно менять исходные данные и области поиска решений данный метод может рассматриваться как эффективный инструмент быстрой проверки различных гипотез и большого количества вариантов структуры схем энергоснабжения.

Выводы. Результаты проведенных исследований показали, что предложенный метод позволяет решать задачу оптимального размещения ТП с учетом реальных пространственных условий. Программная реализация метода в среде ГИС и эксперименты по его использованию на реальных данных показывают перспективность использования этого метода при создании САПР электрических сетей.

Список литературы

1. **Шакиров В.А.** Программная поддержка принятия решений по размещению энергетических объектов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2007. – №1(29). – С. 9–10.
2. **Свеженцева О.В., Воропай Н.И.** Оптимизация размещения источников питания при формировании рациональной конфигурации системы электроснабжения // Электричество. – 2012. – № 10. – С. 7–14.
3. **Yu C., Lee J., Munro-Stasiuk M.J.** Extensions to Least-Cost Path Algorithms for Roadway Planning // *Int. J. Geogr. Inform. Sci.* – 2003. – No. 17. – P. 361–376.
4. **Bagli S., Geneletti D., Orsi F.** Routing of Power Lines through Least-cost Path Analysis and Multicriteria Evaluation to Minimise Environmental Impacts // *Environ. Impact Assess. Rev.* – 2011. – No. 31. – P. 234–239.
5. **A Prototype** for Pipeline Routing Using Remotely Sensed Data and Geographic Information System Analysis / S.C. Feldman, R.E. Pelletier, E. Walser et. al. // *Rem. Sens. Environ.* – 1995. – No. 53. – P. 123–131.
6. **Collischonn W., Pilar J.V.** A Direction Dependent Least Cost Path Algorithm for Roads and Canals // *Int. J. Geogr. Inform. Syst.* – 2000. – No. 14. – P. 67–77.
7. **Phillips D.T., Garsia-Diaz A.** Fundamentals of Network Analysis. – Prentice-Hall, Inc.: Englewood Cliffs, NJ, 1981.
8. (16) **Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B.** A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // *IEEE Trans. Syst. Sci. Cybernet.* – 1968. – No. 4. – P. 100–107.
9. **Dijkstra E.W.** A Note on Two Problems in Connexion with Graphs // *Numerische Mathematik.* – 1959. – No. 1. – P. 269–271.
10. **Косяков С.В., Садыков А.М.** Метод зонирования территории по стоимости технологического присоединения к электрическим сетям // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 77–81.
11. **Kosyakov S.V., Sadykov A.M.** GIS-based cost distribution analysis of new consumer connections to an urban power grid // *Geo-spatial Information Science.* – 2015. – Vol. 18(4). – P. 183–192.

References

1. Shakirov, V.A. Programmная podderzhka prinyatiya resheniy po razmeshcheniyu energeticheskikh ob"ektov [Software support of decision-making on power facility placement]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, no. 1(29), pp. 9–10.
2. Svezhentseva, O.V., Voropay, N.I. Optimizatsiya razmeshcheniya istochnikov pitaniya pri formirovanii ratsional'noy konfiguratsii sistemy elektrosnabzheniya [Optimization of power source location for the formaiton of a rational configuration of an electric power supply system]. *Elektrichestvo*, 2012, no. 20, pp. 7–14.
3. Yu, C., Lee, J., Munro-Stasiuk, M.J. Extensions to Least-Cost Path Algorithms for Roadway Planning. *Int. J. Geogr. Inform. Sci.*, 2003, no. 17, pp. 361–376.
4. Bagli, S., Geneletti, D., Orsi, F. Routing of Power Lines through Least-cost Path Analysis and Multicriteria Evaluation to Minimise Environmental Impacts. *Environ. Impact Assess. Rev.*, 2011, no. 31, pp. 234–239.
5. Feldman, S.C., Pelletier, R.E., Walser, E., Smoot, J.C., Ahl, D. A Prototype for Pipeline Routing Using Remotely Sensed Data and Geographic Information System Analysis. *Rem. Sens. Environ.*, 1995, no. 53, pp. 123–131.
6. Collischonn, W., Pilar, J.V. A Direction Dependent Least Cost Path Algorithm for Roads and Canals. *Int. J. Geogr. Inform. Syst.*, 2000, no. 14, pp. 67–77.
7. Phillips, D.T., Garsia-Diaz, A. Fundamentals of Network Analysis. Prentice-Hall, Inc.: Englewood Cliffs, NJ, 1981.
8. (16) Hart, P.E., Nilsson, N.J., Raphael, B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Trans. Syst. Sci. Cybernet.*, 1968, no. 4, pp. 100–107.

9. Dijkstra, E.W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, no. 1, pp. 269–271.

10. Kosyakov, S.V., Sadykov, A.M. Metod zonirovaniya territorii po stoimosti tekhnologicheskogo prisoedineniya k elektricheskim setyam [Method of area zoning by the cost of connection to

electric networks]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 77–81.

11. Kosyakov, S.V., Sadykov, A.M. GIS-based cost distribution analysis of new consumer connections to an urban power grid. *Geo-spatial Information Science*, 2015, vol. 18(4), pp. 183–192.

Косяков Сергей Витальевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой программного обеспечения компьютерных систем, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34, кор.Б, ауд. 307, телефон (4932) 26-98-40, e-mail: ksv@ispu.ru

Kosyakov Sergei Vitalyevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Head of the Computer Systems Software Department, address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building B, Room 307, telephone (4932) 26-98-40, e-mail: ksv@ispu.ru

Гадалов Александр Борисович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доцент кафедры программного обеспечения компьютерных систем, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34, кор.Б, ауд. 305, телефон (4932) 26-98-40, e-mail: gab@ispu.ru

Gadalov Aleksandr Borisovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Associate Professor of the Computer Systems Software Department, address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building B, Room 305, telephone (4932) 26-98-40, e-mail: gab@ispu.ru